

УДК 622.61

В.П. Кондрахин, д-р техн. наук, проф.,
Е.М. Арефьев, инж., асп.,
Н.В. Хиценко, канд. техн. наук, доц.,
Донецкий национальный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

Разработана комплексная математическая модель процесса вибрационной очистки конвейерной ленты, учитывающая параметры очистителя и особенности работы электромагнитного вибровозбудителя

Ключевые слова: математическая модель, вибрационный очиститель, конвейерная лента, процесс виброочистки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Качественная очистка конвейерных лент позволяет уменьшить загрязнение подконвейерного пространства просыпью транспортируемого груза и, как результат, снизить количество аварийных остановок конвейера и износ дорогостоящих элементов конвейера - роликоопор и ленты. Анализ известных устройств для очистки лент позволяет сделать вывод о перспективности виброочистных устройств, принцип действия которых основан на отрыве загрязняющих примазок от рабочей обкладки ленты. Это объясняется тем, что очистители позволяют исключить взаимный износ рабочей обкладки ленты и рабочего органа очистителя, снизить коэффициент сопротивления движению ленты и т.д. Несмотря на весомые преимущества, вибрационные очистители исследованы еще не достаточно полно. Такие вопросы как разработка математической модели процесса виброочистки, а, следовательно, и выбор оптимальных параметров вибрационных очистителей, требуют специальных исследований.

Анализ исследований и публикаций. Исследованием процесса вибрационной очистки конвейерных лент занимались В.Д. Зиневич и Ю.А. Пертен. В работе [1] ими рассматриваются поперечные колебания конвейерных лент. В результате работы авторы делают вывод о том, что при значительном превышении частоты колебаний возмущающей силы над частотой собственных колебаний ленты можно получить ударное воздействие очистителя на ленту, при котором очистка происходит наиболее эффективно.

В работе [2] Ю.Д. Тарасов утверждает, что необходимое качество очистки может быть достигнуто при выполнении одного из двух условий: либо создании резонансного режима работы очистителя, либо обеспечении условия непрерывности очистки ленты при дорезонансном режиме работы очистителя, что противоречит рекомендациям работы [1].

Полученные в работах [1,2] результаты не позволяют полностью описать процесс взаимодействия рабочего органа очистителя с лентой, поскольку принятые расчетные схемы имеют ряд упрощений: во-первых, не учитываются деформации и, соответственно, силы, возникающие при контакте рабочего органа очистителя с лентой, во-вторых - предполагается, что сила действует по гармоническому закону без учета особенностей конструкции очистителя и работы вибровозбудителя, в третьих – отсутствует обоснование режима работы очистителя с учетом свойств загрязняющей примазки и допустимых контактных усилий в ленте.

Постановка задачи. Целью работы является разработка комплексной математической модели процесса вибрационной очистки, учитывающей параметры очистителя, ленты, а также свойства загрязняющей примазки.

Изложение материала и результаты. Виброочиститель (рис. 1) состоит из шарнирно закрепленной на стойке 1 и подвешенной на пружине 2 рамы 3, на которой установлены роликовый рабочий орган 4 и якорь 5 электромагнита 6. Очищаемая конвейерная лента 7 движется со скоростью V .

При составлении расчетной схемы приняты следующие допущения: лента представлена в виде сосредоточенной массы; не учитываются упругости рамы очистителя и оси крепления ролика, изгибные деформации пружины, перекосы и вращение ролика; принята линейная упругая характеристика ленты; колебания ленты в процессе виброочистки не значительно влияют на ее натяжение.

На схеме (рис. 1) обозначены следующие параметры очистителя и ленты: l_n - расстояние от оси вращения рамы до места крепления пружины; l_2 - расстояние между осью вращения рамы очистителя и осью якоря; l_3 - расстояние между осями вращения рамы очистителя и рабочего органа; l_Σ - расстояние от оси вращения рамы очистителя до центра масс очистителя; r_p - радиус рабочего органа очистителя; $\Delta h'$ - координата верхней точкой ролика холостой ветви; Δh_0 - рас-

тояние от нижней точки рабочего органа очистителя A до ленты перед началом работы очистителя; c – коэффициент жесткости пружины; S – натяжение ленты в зоне очистки; c_{np} – коэффициент приведенной к середине пролета жесткости ленты; c_k – коэффициент контактной жесткости ленты; β_k – коэффициент сопротивления движению при контакте рабочего органа очистителя с лентой; b_1 , b_2 – коэффициенты сопротивления движению очистителя и ленты соответственно; m_{np} – приведенная к середине пролета масса ленты; m_Σ – суммарная масса всех элементов системы, закрепленных на раме очистителя; P_k – сила реакции ленты; F_{np} – сила пружины; F_y – сила с которой электромагнит воздействует на якорь. В катушке электромагнита 6 создается напряжение U_3 и протекает ток силой I_3 .

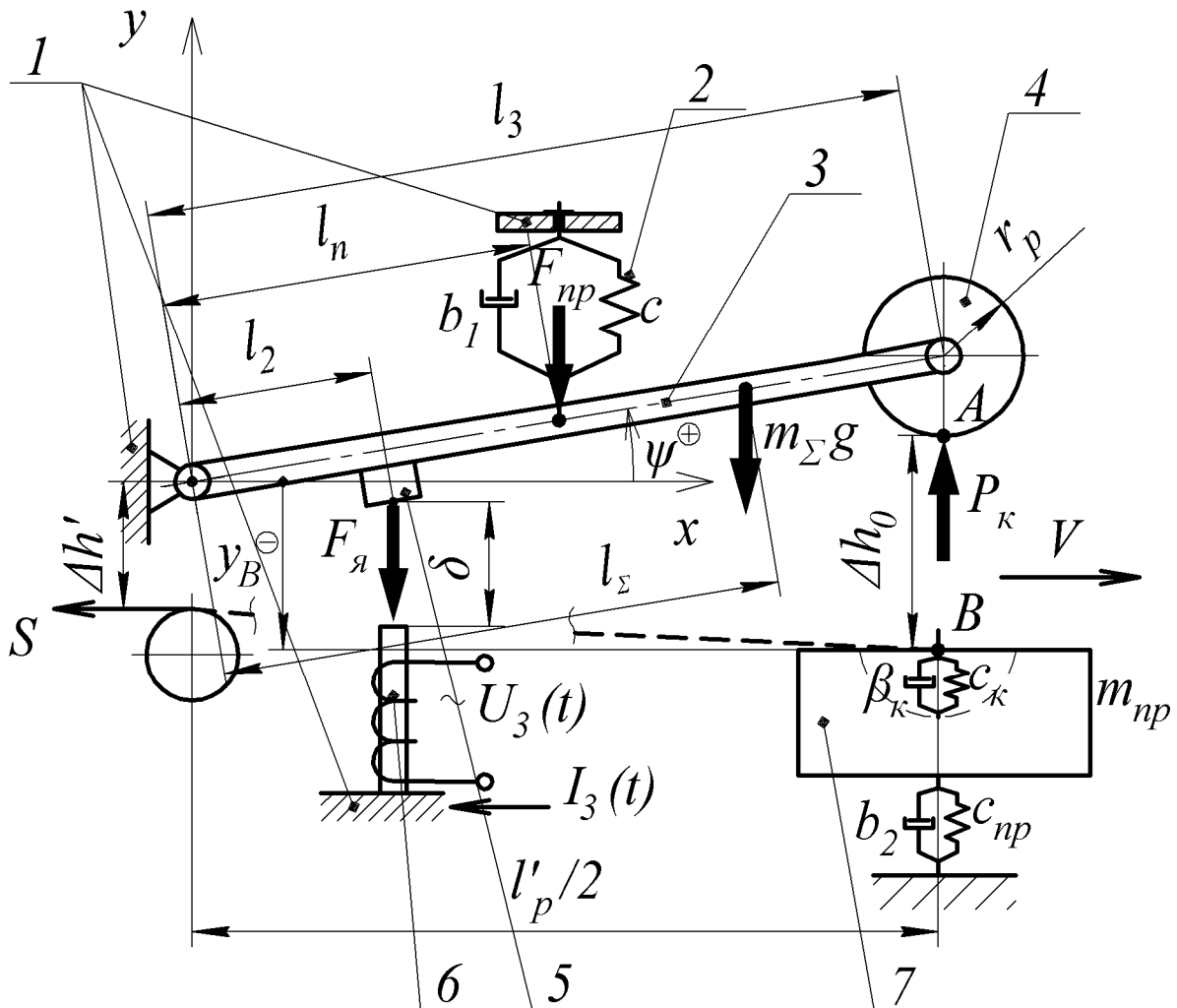


Рис. 1. - Принципиальная схема физической модели взаимодействия вибрационного очистителя с конвейерной лентой

Обобщенными координатами системы являются: ψ - угол поворота рамы очистителя относительно горизонтальной оси; y_B - координата точки В на поверхности ленты, соответствующей месту контакта с нижней точкой рабочего органа очистителя А при условии отсутствия контактных деформаций в ленте.

Для получения уравнения колебаний вибрационного очистителя запишем силы, действующие на виброочиститель:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}I_0 &= [P_\kappa l_3 - F_\kappa l_2 - m_\Sigma g l_\Sigma] \cos \psi - F_{np} l_n \cos(\psi - \psi_{01}) - \dot{\psi} b_1 = \\ &= [P_\kappa l_3 - F_M l_2 - m_\Sigma g l_\Sigma] \cos \psi - \frac{l_n^2}{2} c \sin(2(\psi - \psi_{01})) - \dot{\psi} b_1 \end{aligned} \quad (1)$$

где I_0 - момент инерции рамы очистителя с закрепленными на ней элементами относительно оси вращения; сила реакции ленты P_κ :

$$P_\kappa = \begin{cases} c_\kappa \Delta_\kappa + \beta_\kappa \dot{\Delta}_\kappa, & \text{при } \Delta_\kappa > 0; \\ 0, & \text{при } \Delta_\kappa \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где Δ_κ , $\dot{\Delta}_\kappa$ - глубина и скорость деформации ленты, $\Delta_\kappa = y_B - l_3 \sin \psi + r_p$; ψ_{01} - угол поворота рамы конвейера, соответствующий недеформированному состоянию пружины, определяется коэффициентом жесткости пружины подвески очистителя c и геометрическими параметрами очистителя; $\dot{\psi}$ - угловая скорость очистителя; $F_{np} = c l_n \sin(\psi - \psi_{01})$ - сила пружины.

Сила $F_\kappa = F_M + F_{\kappa M}$, где F_M - сила притяжения якоря электромагнита к ярму, которая зависит от зазора δ между ними и силы тока в катушке электромагнита I_3 [3]; $F_{\kappa M}$ - сила, возникающая при соударении ярма и якоря:

$$F_M = a_1 - a_2 \delta + a_3 \delta^2 + a_4 I_3 \delta + a_5 I_3 + a_6 I_3^2, \quad (3)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ - коэффициенты, определяемые экспериментально.

Зазор между ярмом и якорем определяется как $\delta = \delta_0 + l_2(\psi - \psi_0)$, где δ_0 - начальный зазор между ярмом и якорем электромагнита, ψ_0 - начальный угол наклона рамы очистителя.

$$F_{\kappa M} = \begin{cases} -c_m \cdot \Delta t - \beta_m l_2 \dot{\psi}, & \text{если } \Delta t < 0; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (4)$$

где c_m - коэффициент контактной жесткости элементов магнитопровода; β_m - коэффициент сопротивления движению при контакте ярма и якоря; $\Delta m, \Delta m_0$ - текущий и начальный зазор между ярмом и якорем, $\Delta m = \Delta m_0 + l_2 \sin(\psi - \psi_0)$.

Схема электромагнитного привода виброочистителя представлена на рис. 2. Ток I_3 зависит от напряжения на катушке электромагнита U_3 и ее параметров: сопротивления R_k и индуктивности L_k катушки [4]:

$$\dot{I}_3 = \frac{U_3 - I_3 R_k}{L_k}, \quad (5)$$

Напряжение сети $U_1 = U_m \cdot \sin(\omega_c t)$ подается на силовой коммутирующий элемент (СКЭ), где преобразуется согласно формуле:

$$U_2 = \begin{cases} U_1, \text{ при } t - T_u \left] \frac{t}{T_u} \left[< k_t T_u, \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (6)$$

где U_m и ω_c - соответственно амплитудное значение напряжения и частота питающей сети; $T_u = \frac{1}{f}$ - период импульсов напряжения U_2 , задаваемых микропроцессорной системой управления МСУ, где f, k_t - частота и скважность импульсов напряжения U_2 .

Далее напряжение U_2 выпрямляется на диодном мосту, в результате на катушке электромагнита формируется импульсное напряжение $U_3 = |U_2|$.

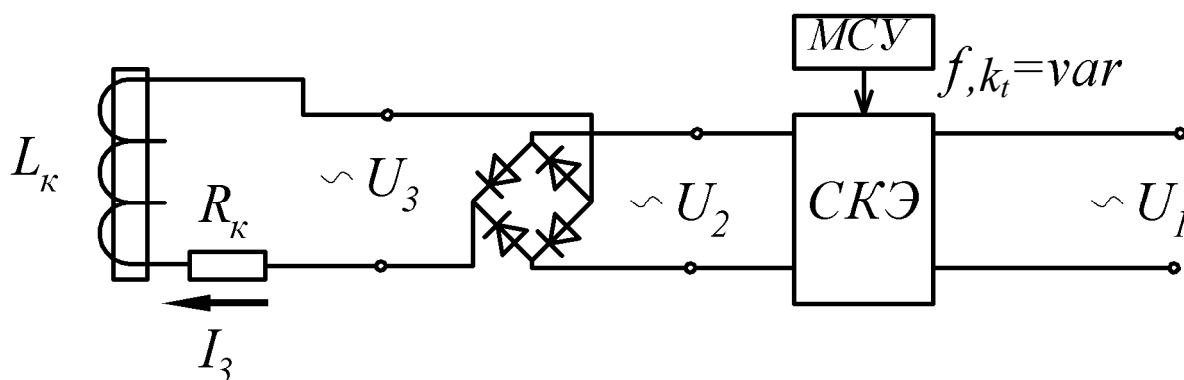


Рис. 2. – Схема системы питания электромагнитного вибровозбудителя

В работе [5] тягово-несущий орган рассматривается как весомая нить, которая прогибается в поле силы тяжести по параболе. При ви-

броочистке, рабочий орган очистителя бьет по ленте, в результате чего она прогибается в середине пролета и ее профиль между роlikоопорами и местом удара приближается к прямым линиям. Это подтверждается результатами исследований процесса взаимодействия виброочистителя с лентой на стенде [3], которые показывают, что прогиб ленты при виброочистке составляет 10...15 мм и на порядок превышает прогиб ленты под действием собственного веса. Таким образом, профиль ленты при виброочистке может быть задан прямолинейным.

Лента представляет собой колебательную систему с распределенными параметрами, но при небольших значениях пролета между роlikоопорами волновыми процессами в ленте можно пренебречь и перейти к одномассовой системе с приведенной к середине пролета массой, определяемой из условия равенства кинетических энергий [6]:

$$m_{np} = \frac{q_l l'_p}{3}, \quad (7)$$

где q_l - погонная масса ленты; l'_p - расстояние между роlikоопорами в месте очистки. Коэффициент приведенной к середине пролета жесткости ленты составил:

$$c_{np} = \frac{4S}{l'_p}. \quad (8)$$

Для описания поперечных колебаний ленты необходимо математически описать положение точки B , для чего ранее была введена обобщенная координата y_B (рис. 1). Координата точки B в начальный момент времени с учетом ее провеса под собственным весом [7]:

$$y_{B0} = \Delta h' + \frac{q_l l_p'^2 g}{8S}. \quad (9)$$

Уравнение движения точки B в вертикальной плоскости, можно записать в следующем виде:

$$\ddot{y}_B = -\frac{c_{np}}{m_{np}} \left[y_B - \left(\Delta h' - \frac{q_l l_p'^2 g}{8S} \right) \right] - g \cos \beta - \frac{P_k}{m_{np}} - \dot{y}_B \frac{b_2}{m_{np}}, \quad (10)$$

где β - угол наклона конвейера.

Толщина неотделенного слоя примазки на конвейерной ленте после виброочистки определяется прочностью прилипания примазки

на отрыв σ [2] и максимальными виброускорениями, действующими на ленту, $a_{\max} = \max_{T_u}(\ddot{y}_B)$:

$$h_n = h_{адг} + \frac{\sigma}{\rho(a_{\max} + g)}, \quad (11)$$

где $h_{адг}$ - толщина адгезионного слоя на ленте [8]; ρ - плотность примазки.

Таким образом, комплексная математическая модель, описывающая процесс вибрационной очистки конвейерной ленты примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{y}_B = -12S \frac{y_B - \Delta h'}{q_l l_p^2} - \left(\frac{3}{2} + \cos \beta \right) g - \frac{3P_\kappa}{q_l l_p} - \frac{3\dot{y}_B b_2}{l_p q_l}; \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_0} \left([-F_\kappa l_2 + P_\kappa l_3 - m_\Sigma g l_\Sigma] \cos \psi - \frac{l_n^2}{2} c \sin(2(\psi - \psi_{01})) - \dot{\psi} b_1 \right); \\ \dot{I}_3 = \frac{U_3 - I_3 R_\kappa}{L_\kappa}; \\ U_2 = \begin{cases} |U_m \cdot \sin(\omega_c t)|, \text{ при } t - T_u \left[\frac{t}{T_u} \right] < k_t T_u; & T_u = \frac{1}{f}; \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \\ F_\kappa = F_M + F_{\kappa M}; & F_M = a_1 - a_2 \delta + a_3 \delta^2 + a_4 I_3 \delta + a_5 I_3 + a_6 I_3^2; \\ F_{\kappa M} = \begin{cases} -c_m \cdot \Delta m - \beta_m l_2 \dot{\psi}, \text{ если } \Delta m < 0; \\ 0, \text{ иначе;} \end{cases} \\ \Delta m = \Delta m_0 + l_2 \sin(\psi - \psi_0); & \Delta_\kappa = y_B - l_3 \sin \psi + r_p; \\ F_M = a_1 - a_2 \delta + a_3 \delta^2 + a_4 I_3 \delta + a_5 I_3 + a_6 I_3^2; & \\ P_\kappa = \begin{cases} c_\kappa \Delta_\kappa + \beta_\kappa \dot{\Delta}_\kappa, \text{ при } \Delta_\kappa > 0; \\ 0, \text{ иначе;} \end{cases} & \\ h_n = h_{адг} + \frac{\sigma}{\rho(a_{\max} + g)}; & a_{\max} = \max_{T_u}(\ddot{y}_B); \end{array} \right. \quad (12)$$

Полученная математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений 5-го порядка, которая может быть эффективно решена с применением численного метода Рунге-Кутты. Результатом математического моделирования являются максимальные виброускорения в процессе очистки, толщина неотделенного слоя

примазки на ленте после виброочистки h_n и контактные усилия в ленте P_k .

Оценка адекватности полученной математической модели основывалась на сопоставлении результатов инструментальных измерений с применением современных виброизмерительных приборов, с результатами математического моделирования процесса вибрационной очистки конвейерной ленты. Значения виброускорений, полученные при имитационном моделировании отличаются от экспериментальных не более чем на 11,2 %. На рисунке 3 показан пример реализации моделирования и экспериментальные значения ускорения конвейерной ленты.

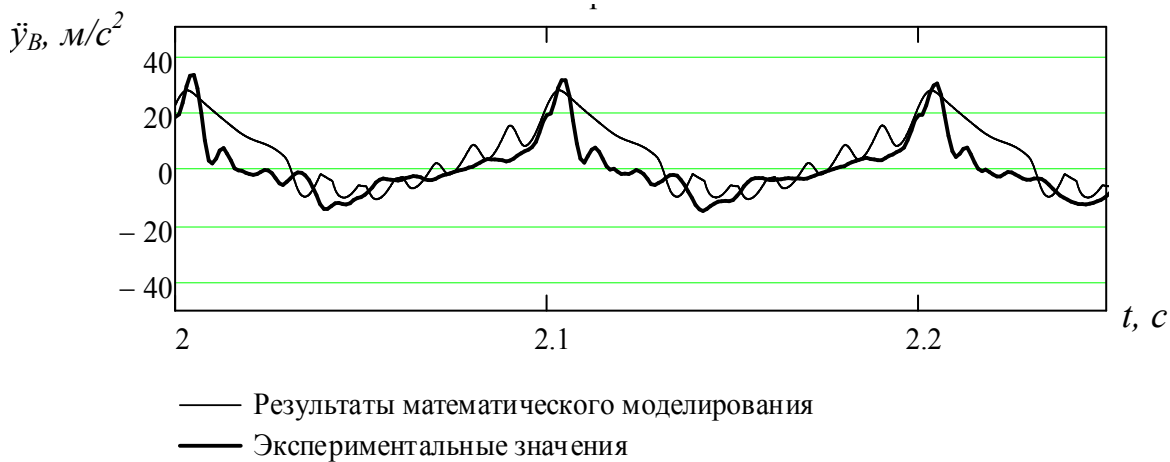


Рис. 3. – Результаты моделирования и экспериментальные значения ускорения конвейерной ленты

Как видно из графика (рис. 3), экспериментальные измерения согласуются с теоретически предсказанными численными значениями, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальной системе.

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработана комплексная математическая модель процесса вибрационной очистки конвейерной ленты, представляющая собой систему нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, учитывающая параметры очистителя и особенности работы электромагнитного вибровозбудителя (нелинейность зависимости магнитной силы от зазора, возможность ударов якоря по магнитопроводу). Модель позволяет оценить влияние на качество виброочистки параметров очистителя со стационарным электромагнитным вибровозбудителем, параметров и условий работы конвейера, а также свойств транспортируемого груза. В дальнейшем планируется разработка критерия качества очистки кон-

вейерной ленты вибрационным очистителем и оценка допустимых контактных усилий в ленте, которые, вместе с результатами математического моделирования, будут использованы при обосновании параметров вибрационного очистителя.

Список литературы

1. Зиневич В.Д. Вибрационная очистка конвейерных лент / В.Д. Зиневич, Ю.А. Пертен // Горные машины и автоматика. – М.: ЦИТИУгля, 1961.
2. Тарасов Ю.Д. Очистка конвейерных лент и подконвейерного пространства / Ю.Д. Тарасов. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
3. Экспериментальная оценка эффективности режимов работы виброочистителя конвейерной ленты / В.А. Будишевский, Е.М. Арефьев, В.А. Яценко и др. // Уголь Украины. – 2011. – №2. – С. 20-24.
4. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М.В. Немцов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.: ил.
5. Кондрахин П.М. Основы теории процессов формирования нагрузок элементов рудничных магистральных конвейеров с учетом межопорного провисания тягово несущего органа: Дисс. докт. техн. наук. 05.05.06 / П.М. Кондрахин. – Донецк, 1975. – 439 с.
6. Исследование режимов работы вибрационного очистного устройства конвейерных лент / В.А. Будишевский, Е.М. Арефьев, Н.В. Хиценко и др. // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок. Збірник наукових праць. – 2008-2009. – С. 383-395.
7. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – М.: Наука, 1984. – Т. 1. – 560 с.
8. Будишевский В.А. Обоснование условия образования и оценка толщины адгезионного слоя угольной примазки на конвейерной ленте / В.А. Будишевский, Е.М. Арефьев, Н.В. Хиценко // Материалы научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок», посвященной 80-летию НИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецьк: ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова», 2009. – С. 236-243.

Стаття надійшла до редколегії 12.10.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Борщевський С.В.

В.П. Кондрахін, Є.М. Ареф'єв, М.В. Хиценко. Математична модель процесу вібраційного очищення конвеєрної стрічки. Розроблена комплексна математична модель процесу вібраційного очищення конвеєрної стрічки, що враховує параметри очисника та особливості роботи електромагнітного віброзбудника.

Ключові слова: математична модель, вібраційний очисник, конвеєрна стрічка, процес віброочищення.

V. Kondrakhin, E. Arefyev, N. Khitsenko. A Mathematical Model of the Process of Vibrating Cleaning of the Conveyor Belt. A complex mathematical model of the process of vibrating cleaning of the conveyor belt considering parameters of a cleaner, features of work of electromagnetic vibration drive is developed.

Keywords: mathematical model, vibrating cleaner, conveyor belt, process of vibrating cleaning.

© Кондрахин В.П., Арефьев Е.М., Хиценко Н.В., 2012